

УДК 537.523.9

О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ СВЕРХКОРОТКОГО ЛАВИННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ГАЗОВОМ ДИОДЕ

И.Д. Костыря, М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Рыбка, Е.Х. Бакшт

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Исследовано пространственное распределение убегających электронов и рентгеновского излучения, генерируемых в газовом диоде при подаче наносекундных импульсов высокого напряжения. Показано, что в газонаполненном диоде (воздух при давлении 1 ата) с резко неоднородным электрическим полем сверхкороткий (<100 пс) лавинный электронный пучок генерируется в тесный угол, превышающий 2π ср. Уменьшение зазора d между катодом и анодом приводит к уменьшению амплитуды тока пучка, генерируемого на боковые стенки газового диода. Однако ток пучка на боковую стенку газового диода регистрируется на коллектор, установленный перпендикулярно оси газового диода, и при малых зазорах ($d=8$ мм) межэлектродного промежутка.

Введение

В последние годы возрос интерес к изучению условий генерации и параметров пучков электронов, генерируемых в газовых диодах при повышенных давлениях различных газов, а также к исследованиям характеристик рентгеновского излучения в этих условиях [1–12]. Сверхкороткие лавинные электронные пучки (СЛЭП) с длительностью не более 100 пс на полувысоте были получены в воздухе, гелии, неоне, аргоне, криптоне, ксеноне, метане и элегазе при давлении 1 ата [2, 4]. Последние измерения заряда пучка электронов за фольгой с улучшенной методикой показали, что при длительности импульса на полувысоте ~ 90 пс (данная длительность была равна временному разрешению системы регистрации) и использовании генератора РАДАН-220 с обострительным разрядником на напряжение ~ 270 кВ, амплитуда тока СЛЭП за фольгой из алюминия толщиной 10 мкм составила ~ 50 А [10].

Для выяснения механизма генерации СЛЭП важны не только амплитудно-временные и энергетические характеристики пучков убегających электронов, но и угловые зависимости величины тока и энергетического спектра потока электронов в газонаполненном диоде. Однако пространственное распределение потоков электронов при генерации СЛЭП исследовалось только за плоским анодом из фольги. Так в работе [10] при использовании коллектора с диаметром приемной части 5 или 3 мм, имеющего временное разрешение до 50 пс [8], были получены распределения заряда и плотности тока СЛЭП за фольгой. Оказалось, что пучок электронов регистрируется по всей площади фольги, включая те части фольги, которые примыкают к корпусу газового диода. В [11] было установлено, что при увеличении давления гелия в газовом диоде распределение пучка электронов по сечению фольги изменяется. При переходе к условиям формирования СЛЭП диаметр автографа пучка электронов на фотопленке увеличивается и СЛЭП регистрируется со всей поверхности фольги. В работах [5–7, 9], посвященных исследованию рентгеновского излучения из газовых диодов, рентгеновское излучение было зарегистрировано через боковые стенки газового диода в направлении, перпендикулярном продоль-

ной оси разряда. Однако измерения потока электронов, попадающего на боковые стенки газового диода, ранее не проводились.

Цель настоящей работы — экспериментально исследовать в воздухе атмосферного давления пространственное распределение потока электронов при генерации сверхкороткого лавинного электронного пучка, снять на фотопленку с помощью камеры-обскуры изображения плазмы разряда, как в рентгеновских лучах, так и в лучах УФ и видимого диапазона, а также зафиксировать автографы электронного пучка и рентгеновского излучения.

Экспериментальная аппаратура и методики

Эксперименты проводились с использованием газовых диодов, конструкция которых приведена на рис. 1 и 2. Рабочий газ — воздух при атмосферном давлении. Катодом, как и в работах [8, 10], служила трубка диаметром ~ 6 мм из стальной фольги толщиной 100 мкм. Вывод электронного пучка осуществлялся через Al фольгу толщиной 10...50 мкм или через AlBe фольгу толщиной 50 мкм. Расстояние между анодом и катодом основного зазора могло изменяться от 8 до 30 мм. В корпусе газового диода № 1, рис. 1, были сделаны окна, которые закрывались фольгой или сеткой. Расстояние между катододержателем (боковой поверхностью катода) и внутренней цилиндрической поверхностью газового диода составляло 24 мм для газового диода № 1 и 22 мм для газового диода № 2. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220 [13]. Генератор формировал импульсы напряжения с амплитудой ~ 250 кВ, длительностью импульса на полувысоте при согласованной нагрузке ~ 2 нс и временем нарастания $\sim 0,5$ нс. Коллекторы, которые использовались для измерения амплитуды тока СЛЭП, в совокупности с использовавшимися регистрационными кабелями, имели временное разрешение ~ 140 пс. Приемная часть коллектора состояла из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50 Ом. Основание конуса, обращенное к фольге, имело диаметр 20 мм и располагалось на расстоянии 5 мм от фольги. Коллекторы устанавливались как на продольной оси газовой

го диода (коллектор 4, рис. 1), так и сбоку — с внешней стороны окон на корпусе газового диода № 1 (коллектор 5, рис. 1). Электрические сигналы с емкостного делителя напряжения и шунта из чип-резисторов [12] подавались на цифровой осциллограф TDS6604 (6 ГГц, $2 \cdot 10^{10}$ выборок/с). Предельное временное разрешение системы регистрации при использовании коротких кабелей (< 1 м) составляло ~ 100 пс.

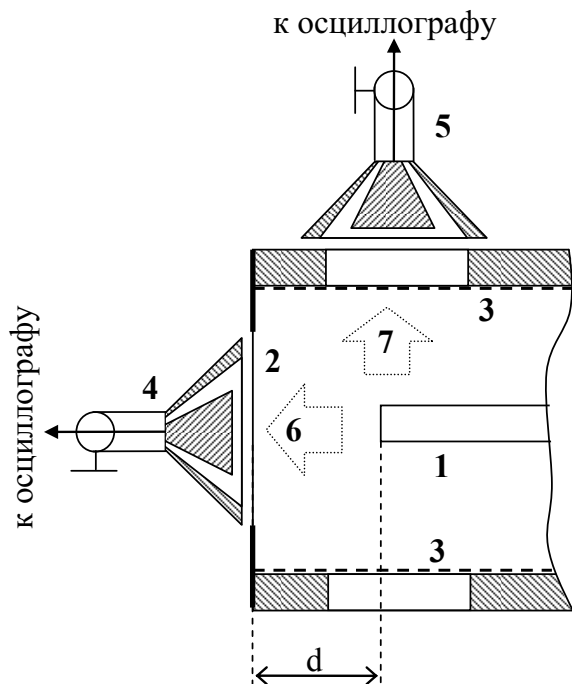


Рис. 1. Конструкция газового диода и система регистрации потоков электронов СЛЭП: 1) катод; 2) плоский анод (фольга, сетка); 3) металлическая сетка; 4) коллектор для регистрации электронов вдоль продольной оси диода; 5) коллектор для регистрации электронов сбоку; 6, 7) потоки СЛЭП на коллекторы 4, 5; d) расстояние между катодом и анодом

Рентгеновское излучение и пучок электронов фиксировались по засветке пленки РФ-3, которая помещалась в конверт из черной бумаги толщиной ~ 100 мкм. Конверт располагался или сразу же за анодом (торцевой или боковой поверхностью газового диода, закрытой сеткой или (и) алюминиевой фольгой толщиной 10...50 мкм), или на определенном расстоянии от анода из медной фольги толщиной 250 мкм, рис. 2. Во втором случае (камера-обскура) в фольге имелись отверстия диаметром ~ 350 мкм, за счет которых формировались изображения на фотопленке. При экспериментах с пленкой в конверте из черной бумаги на ней появлялось изображение в результате воздействия пучка электронов и рентгеновского излучения. Как показали исследования, почернение фотопленки было максимальным при воздействии на нее электронного пучка и мягкого рентгеновского излучения, которое возникало при торможении электронного пучка в конверте и фольге. В экспериментах с открытой пленкой (без конверта) на ней формировалось

изображение плазмы разряда. Пленка была чувствительна к излучению в УФ и видимой области спектра. Временная форма импульсов рентгеновского излучения регистрировалась с помощью полупроводникового детектора СППД11 – 04, временное разрешение которого составляло $\sim 1,5$ нс. Детектор был предназначен для регистрации рентгеновских квантов с энергией от 0,4 до 40 кэВ. Как показали измерения, он имел более высокую чувствительность к электронам пучка, чем к квантам рентгеновского излучения. Поэтому для регистрации рентгеновского излучения перед детектором устанавливался дополнительный фильтр из полиэтилентерфталата или полиэтилена.

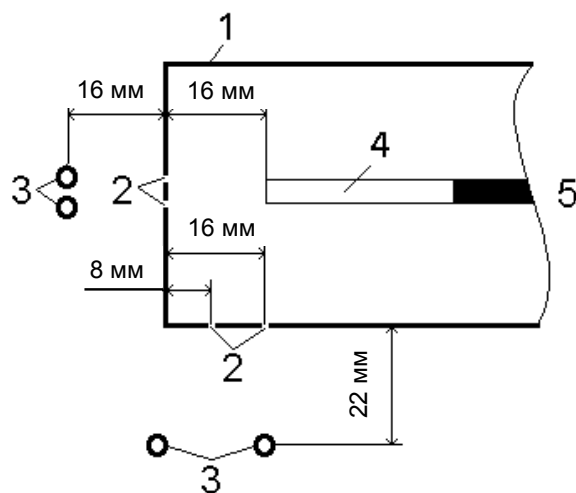


Рис. 2. Конструкция газового диода: 1) корпус газового диода; 2) отверстия в корпусе диаметром ~ 350 мкм; 3) автографы электронного пучка и рентгеновского излучения на фотопленке; 4) катод, укрепленный на катододержателе; 5) точка подключения генератора наносекундных импульсов

Результаты

Измерения показали, что напряжение пробоя газового диода при $d=12$ мм составляет ~ 250 кВ. Увеличение зазора, как и следовало ожидать, приводило к увеличению пробивного напряжения. Время запаздывания пробоя промежутка также зависело от d и составляло ~ 700 пс для $d=12$ мм.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды тока СЛЭП, регистрируемого с торца газового диода, от величины межэлектродного зазора между катодом и плоским анодом. Там же приведена зависимость амплитуды СЛЭП, регистрируемого через боковое окно от величины межэлектродного зазора. Обе зависимости снимались при одновременной регистрации тока пучка с торца и с боку. Уменьшение d приводило к уменьшению амплитуды тока СЛЭП сбоку, однако и при зазоре 8 мм боковым коллектором регистрировался ток пучка. Форма импульсов тока пучка с обоих коллекторов была одинаковой. Импульсы имели длительность на полувысоте ~ 140 пс, что соответствовало временному разрешению системы регистрации при одновре-

менном измерении сигналов с двух коллекторов. Оба сигнала приходили на осциллограф практически одновременно. Длительность импульсов рентгеновского излучения и тока пучка, регистрируемых детектором СППД11 – 04, составила $\sim 1,5$ нс. По-видимому, реальная длительность импульсов рентгеновского излучения на полувысоте существенно короче, но для ее измерения требуется детектор с более высоким временным разрешением.

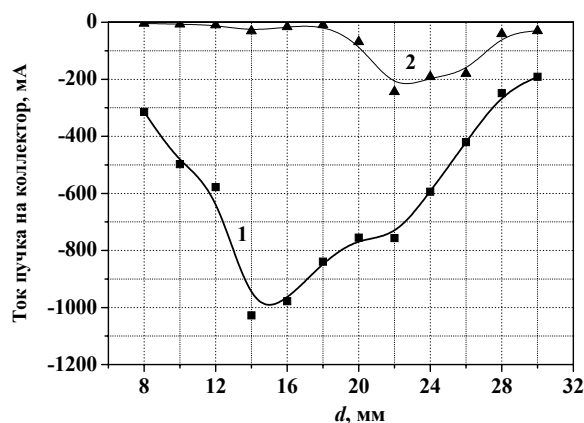


Рис. 3. Амплитуда тока СЛЭП, регистрируемого: 1) вдоль продольной оси и 2) сбоку от газового диода

Из результатов проведенных экспериментов следует, что СЛЭП генерируется как в основном промежутке на оси газового диода, так и между катодом (катододержателем) и корпусом газового диода. Генерация СЛЭП на корпус газового диода имела место и при малом основном зазоре ($d=8$ мм). Этот зазор был в три раза меньше расстояния от катододержателя до боковой стенки (24 мм). Полный телесный угол, в который генерировался СЛЭП, в данных экспериментах превышал 2π ср. Соответственно, амплитуда СЛЭП при регистрации убегающих электронов во всех направлениях существенно превышает амплитуду тока пучка, измеряемую за фольгой, которая устанавливается перпендикулярно продольной оси газового диода. Эта разница будет увеличиваться при удлинении катододержателя и боковых стенок газового диода.

Проверка результатов, полученных при измерении тока СЛЭП коллектором, была проведена на газовом диоде № 3, который был подобен газовому диоду на рис. 2. В газовом диоде № 3 с торца и сбоку имелись окна, которые закрывались тонкой алюминиевой фольгой. За окнами помещалась фотопленка в конверте из черной бумаги. Это позволило, как и в работах [5–7, 9], зарегистрировать по почернению фотопленки рентгеновское излучение и электроны пучка с торца и сбоку газового диода. Данный результат также подтверждает генерацию пучка электронов в телесный угол, превышающий 2π ср.

Кроме того, с газовым диодом № 2 были сняты автографы электронного пучка и мягкого рентгеновского излучения, которые регистрировались фотопленкой одновременно, а также фотографии свечения разрядной плазмы в видимом и УФ диапа-

зоне. Полученные обскурограммы приведены на рис. 4. На фотографии разряда в УФ и видимой областях спектра, рис. 4, а, на катode видны более яркие катодные пятна и диффузные струи. Полученные снимки совпадают с фотографиями, полученными с помощью фотоаппарата в подобных условиях, см., например, [1]. Однако обскурограмма, полученная при одновременном воздействии на фотопленку, помещенную в конверт, электронного пучка и рентгеновского излучения, существенно отличается от фотографии разряда. Из анализа обскурограмм на рис. 4 можно предположить, что электронный пучок генерируется с границы области с внешним диаметром не менее 12 мм. Эта область имеет форму, близкую к сферической, и занимает около половины разрядного промежутка. При этом генерация электронного пучка происходит не только в направлении анода, рис. 4, б, и рис. 4, в, но и перпендикулярно продольной оси газового диода в направлении его боковых стенок, рис. 4, г (в телесный угол, превышающий 2π ср).

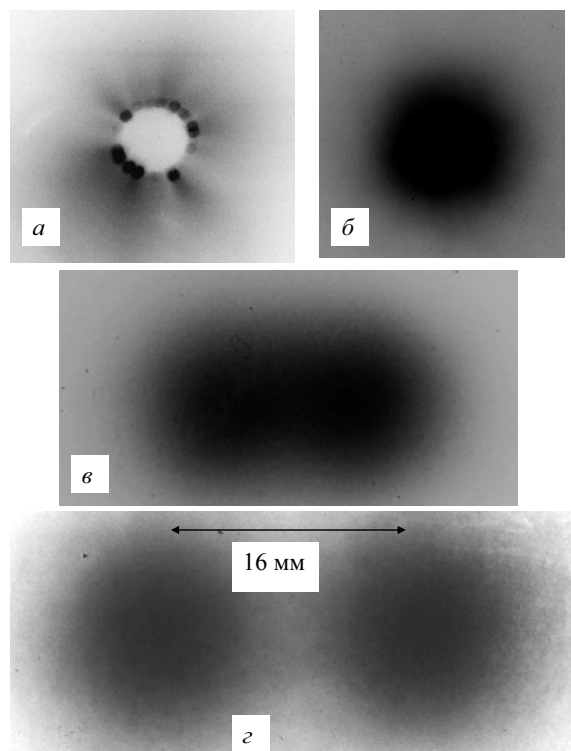


Рис. 4. Обскурограммы, полученные на газовом диоде № 2 для условий, см. рис. 2. Пленка без конверта (а) и в светонепроницаемом конверте (б, в, г). а) съемка через отверстие на оси газового диода; б) съемка через отверстие на оси газового диода; в) съемка через два отверстия, расположенные симметрично на расстоянии 2,5 мм от оси газового диода; г) съемка через два отверстия, расположенные на расстоянии 8 и 16 мм от плоскости фольги

Кривые поглощения, построенные по данным об ослаблении тока пучка, проходящего через пакеты фольг разной толщины, соответствующие пучкам электронов с торца и сбоку диода, оказались одинаковыми. Это свидетельствует об иден-

точности энергетического спектра пучков электронов, направленных как вдоль, так и перпендикулярно оси диода.

Обсуждение результатов

При подаче импульсов напряжения амплитудой в сотни киловольт на промежутке за счет усиления поля на микро- и макронеоднородностях катода достигается высокая напряженность электрического поля. Это приводит к автоэмиссии с катода на переднем фронте импульса напряжения. Подтвердим этот вывод простыми оценками. Для катода в виде лезвия можно оценить усиление электрического поля β у его поверхности по формуле [14]: $\beta \sim (r \cdot d)^{-0.5}$, где $\beta = E/U$, E — напряженность поля у поверхности катода, В/см; U — приложенное напряжение, В; d — расстояние между катодом и анодом, см; r — радиус скругления катода, см. В используемом газовом диоде $d \sim 1$ см, $r \sim 50$ мкм, соответственно, $\beta \sim 14$. Микроострия на катоде обеспечивают усиление поля еще в 10...100 раз [15]. Таким образом, у поверхности катода электрическое поле на фронте импульса достаточно для появления заметного автоэмиссионного тока [16]. Следует также учесть, что оксидные пленки на поверхности катода, возникающие при наличии воздуха, понижают значение напряженности поля, при котором наблюдается автоэлектронная эмиссия.

Эмитируемые электроны за счет усиления электрического поля у катода могут приобрести энергию, достаточную для их убления [1] (быстрые электроны в прикатодной области усиленного электрического поля). При удалении от микроострий на катоде и кромки катода электрическое поле уменьшается, и быстрые электроны теряют свою энергию, в основном на ионизацию частиц в прикатодной области. Одновременно, образовавшиеся вторичные и автоэмиссионные электроны в растущем, за счет увеличения напряжения на промежутке, электрическом поле инициируют развитие электронных лавин. Концентрация начальных электронов настолько велика, что головки лавин перекрываются до образования стримера, и у катода образуется сравнительно плотная плазма диффузного разряда, фронт которой движется от катода к аноду. В данных условиях, как было показано ранее [1, 5–7, 9], в промежутке обычно формируется диффузный разряд. На фронте плотной плазмы, который образуют головки лавин движущихся к аноду, при этом возникает избыточный отрицательный заряд.

При достижении плазмой определенного размера и, соответственно, уменьшения зазора между фронтом плазмы и анодом, а также за счет увеличения напряжения на промежутке, между границей плазмы и анодом достигается критическое поле E_{cr} (см. кривые С.И. Яковленко в [1]) и генерируется поток электронов. Согласно [1] E_{cr} при котором значительная часть электронов переходит в режим убления, можно определить из выражения

$\alpha(E_{cr}, p)d=1$ где: α — первый коэффициент Таунсенда, p — давление газа и d — межэлектродный зазор. Данный критерий получен для промежутков с однородным электрическим полем при малых (близких к нулевым) начальных энергиях электронов. Следует отметить, что при увеличении начальной энергии электронов критическое поле уменьшается, и электроны переходят в режим убления при меньших электрических полях [17, 18].

Мы предполагаем, что в условиях данного эксперимента энергия части электронов на фронте плотной плазмы за счет их ускорения на начальном участке фронта импульса напряжения и избыточного отрицательного заряда в головках лавин все время увеличивается и может достигать единиц кэВ [19]. Для этих электронов электрическое поле в промежутке для условий, рис. 4, становится достаточным для убления. Избыточный отрицательный заряд электронов на фронте плотной плазмы увеличивает электрическое поле в промежутке, а предварительно набранная частью электронов энергия, как мы отмечали выше, способствует снижению величины критического поля.

Как предполагается в данной работе, источником электронов и рентгеновского излучения является область, которая имеет форму, которая близка к сферической, рис. 4. Мы считаем, что в этой области к моменту генерации СЛЭП формируется плотная плазма, фронт которой движется от катода к аноду. В связи с тем, что плотная плазма у катода имеет форму, которая близка к сферической, СЛЭП генерируется из высокоэнергетичных электронов на фронте волны ионизации, в телесный угол, превышающий 2π ср. Далее электроны пучка продолжают ускоряться при движении к аноду (корпусу газового диода). При этом энергия электронов увеличивается, как за счет увеличения напряжения на промежутке, так и для малой доли электронов пучка за счет эффекта поляризации — самоускорения [20]. Отметим, что часть энергии убегающих электронов тратится на ионизацию газа в промежутке, обеспечивая движение волны ионизации [1, 21]. Ограничение длительности импульса СЛЭП обусловлено переключением промежутка волной ионизации и выравниванием в нем электрического поля.

Выводы

В воздухе атмосферного давления исследовано пространственное распределение потока убегающих электронов и рентгеновского излучения, генерируемых в газовом диоде с резко неоднородным электрическим полем. Показано, что при давлениях 1 ата генерация электронного пучка происходит не только в направлении анода, но и перпендикулярно оси газового диода в направлении его боковых стенок (в угол, превышающий 2π ср). Уменьшение зазора d между катодом и анодом приводит к уменьшению амплитуды тока пучка, генерируемого на боковые стенки газового диода. Однако

и при малых зазорах ($d=8$ мм) межэлектродных промежутков, установленных как вдоль, так и перпендикулярно оси газового диода, ток пучка генерируется на боковую поверхность газового диода, находящуюся на расстоянии от катода в несколько раз большем, чем зазор в межэлектродных проме-

жутках. Генерация пучка электронов в телесный угол, превышающий 2π ср, объясняется тем, что плотная плазма у катода при генерации СЛЭП имеет форму, близкую к сферической.

Работа доложена на VIII Международной конференции «Atomic and Molecular Pulsed lasers», Tomsk, 10–14 September, 2007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. High-power subnanosecond beams of runaway electrons and volume discharge formation in gases at atmospheric pressure // *Plasma Devices and Operations*. – 2005. – V. 13. – № 4. – P. 231–279.
2. Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. Supershort Electron Beam from Air Filled Diode at Atmospheric Pressure // *Laser and Particle Beams*. – 2005. – V. 23. – № 4. – P. 545–551.
3. Krompholz H.G., Hatfield L.L., Neuber A.A., Kohl K.P., Chaparro J.E., Ryu H.-Y. Phenomenology of Subnanosecond Gas Discharge at Pressure Below One Atmosphere // *IEEE Trans. of Plasma Science*. – 2006. – V. 34. – № 3. – P. 927–936.
4. Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. О формировании субнаносекундных импульсов тока пучка большой плотности в газовом диоде при низких давлениях // *Письма в ЖТФ*. – 2006. – Т. 32. – Вып. 21. – С. 69–75.
5. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. Объемное рентгеновское излучение в газовых диодах при атмосферном давлении // *Письма в ЖТФ*. – 2007. – Т. 33. – Вып. 7. – С. 79–86.
6. Братчиков В.В., Гагаринов К.А., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. О рентгеновском излучении при объемных разрядах в воздухе атмосферного давления // *Журнал технической физики*. – 2007. – Т. 77. – Вып. 7. – С. 34–42.
7. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. Рентгеновское излучение из объемного слаботокового разряда в воздухе атмосферного давления // *Письма в ЖТФ*. – 2007. – Т. 33. – Вып. 10. – С. 41–48.
8. Бакшт Е.Х., Балзовский Е.В., Климов А.И., Куркан И.К., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. Коллекторный узел для измерения тока пучка электронов субнаносекундной длительности // *Приборы и техника эксперимента*. – 2007. – № 6. – С. 100–103.
9. Репин П.Б., Репьев А.Г. Пространственно-временные параметры рентгеновского излучения диффузного атмосферного разряда // *Журнал технической физики*. – 2008. – Т. 78. – Вып. 1. – С. 78–85.
10. Тарасенко В.Ф., Рыбка Д.В., Бакшт Е.Х., Костыря И.Д., Ломаев М.И. Генерация и измерение субнаносекундных пучков электронов в газонаполненных диодах // *Приборы и техника эксперимента*. – 2008. – № 2. – С. 62–68.
11. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. О влиянии поперечного магнитного поля на генерацию электронного пучка в газовом диоде // *Журнал технической физики*. – 2008. – Т. 78. – Вып. 6. – С. 143–145.
12. Бакшт Е.Х., Рыбка Д.В., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. Ток разряда и ток сверхкороткого пучка электронов при объемном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // *Письма в ЖТФ*. – 2007. – Т. 33. – Вып. 5. – С. 71–78.
13. Яландин М.И., Шпак В.Г. Мощные малогабаритные импульсно-периодические генераторы субнаносекундного диапазона // *Приборы и техника эксперимента*. – 2001. – № 3. – С. 5–31.
14. Дюжев Н.А., Тишин Ю.И. Молибденовая и кремниевая технологии плоских автоэмиссионных экранов. Какая перспективнее? // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2001. – № 1. – С. 50–53.
15. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Новосибирск: Наука, 1982. – 256 с.
16. Месяц Г.А. Этоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, – 2000. – 424 с.
17. Гуревич А.В., Зыбин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // *Успехи физических наук*. – 2001. – Т. 171. – № 11. – С. 1177–1199.
18. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I., Shunailov S.A., Kostyrya I.D., Tkachev A.N. On the mechanism of subnanosecond electron beam formation in gas – filled diodes // *Laser Physics*. – 2006. – V. 16. – № 3. – P. 526–533.
19. Бабич Л.П. Поляризационное самоускорение электронов // *Физика плазмы*. – 1982. – Т. 8. – № 4. – С. 718–728.
20. Аскарьян Г.А. О новых возможностях ускорения частиц до больших энергий // *Труды ФИАН*. – 1973. – Т. 66. – С. 66–72.
21. Василяк Л.М., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Филигин И.В. Высокоскоростные волны ионизации при электрическом пробое // *Успехи физических наук*. – 1994. – Т. 164. – № 3. – С. 263–286.

Поступила 26.12.2007 г.